

УДК 535.34

ФОРМИРОВАНИЕ НИЗКОИНТЕНСИВНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СОЛИТОНОВ В ФОТОРЕФРАКТИВНОМ КРИСТАЛЛЕ $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$

© 2006 г. Т. В. Габрусева¹, Е. А. Мельникова¹, А. П. Сухоруков², А. Л. Толстик¹

E-mail: tolstik@bsu.by; apsmsu@gmail.com

Исследована динамика формирования пространственных солитонов в фоторефрактивном кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ при различных значениях мощности лазерного излучения и приложенного к кристаллу внешнего электрического поля. Определены пороговое значение напряженности поля и предельное значение мощности светового пучка, определяющие условия наблюдения стабильных пространственных солитонов.

Пространственные солитоны представляют собой устойчивые самоканализирующиеся световые пучки в среде с самофокусирующей нелинейностью показателя преломления, для которых дифракционное расширение пучка уравнивается его нелинейным сжатием [1]. Использование фоторефрактивных материалов позволило получать солитоны при субмикроваттной мощности светового потока [2], проводить эксперименты по взаимодействию солитонов в объемной среде [3], осуществлять ввод/вывод света из многомодового в одномодовое волокно [4] и др. Созданные при распространении солитонов в фоторефрактивных кристаллах волноводы перспективны для применения в перестраиваемых направленных ответвителях, светоделителях [5], устройствах переключения волноводов, что расширяет возможности оптической обработки и передачи информации [6].

Использованный в данной работе фоторефрактивный кристалл $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (ВТО), относящийся к группе симметрии 23 кубической сингонии, характеризуется линейным электрооптическим эффектом. Кристаллы этого класса в отсутствие внешнего электрического поля являются оптически изотропными и обладают довольно высоким электрооптическим коэффициентом ($r_{41} = r_{52} = r_{63} = 5.17 \cdot 10^{-10} \text{ см} \cdot \text{В}^{-1}$ [6]). Кристалл ВТО характеризуется хорошей светочувствительностью и высокой подвижностью носителей заряда, что позволяет достигать малых времен нелинейного отклика при низких интенсивностях лазерного излучения, а невысокая оптическая активность кристаллов ВТО по сравнению с другими кристаллами семейства силленитов и более высокий электрооптический коэффициент делают его привлекательным для различных применений в качестве среды для голографической записи информации с возможно-

стью перезаписи, среды для формирования пространственных солитонов и оптических волноводов.

К настоящему времени существует ряд теоретических [7–9] и экспериментальных работ по исследованию образования [10, 11] и взаимодействия [12] солитонов в фоторефрактивном кристалле ВТО. Экспериментально изучено влияние оптической активности [13, 14], величины внешнего электрического поля [11, 15], диаметра лазерного пучка на входе в среду [15] на эффект самофокусировки световых пучков в фоторефрактивном кристалле. Практический интерес представляет определение условий формирования низкоинтенсивных пространственных солитонов и установление предельных параметров, ограничивающих их область существования.

В данной работе исследовали динамику и условия образования солитоноподобных структур в фоторефрактивном кристалле ВТО при прохождении через него сфокусированного излучения гелий-неонового лазера. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

В качестве источника излучения использовали гелий-неоновый лазер 1, работающий в непрерывном режиме. Интенсивность и поляризацию лазерного излучения регулировали с помощью системы светофильтров 2 и двух поляризаторов 3. Для создания пространственных солитонов лазерный пучок фокусировали линзой 4 с фокусным расстоянием $f = 32 \text{ мм}$ вблизи входной грани кристалла 5. С помощью объектива 6 с фокусным расстоянием $f_0 = 35 \text{ мм}$ изображение пучка на задней грани кристалла переносилось на ПЗС матрицу 7 (разрешение 8 мкм/пиксель).

Для регистрации пространственных солитонов использована методика, на основе которой в приближении гауссовых световых пучков анализировалось положение перетяжки в объеме кристалла. При образовании солитона сфокусированный лазерный пучок распространяется внутри кристалла

¹ Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.

² Московский государственный университет, Москва, Россия.

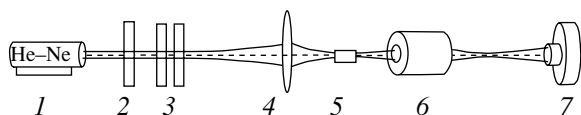
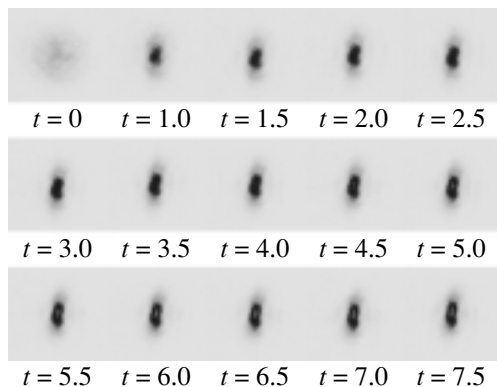
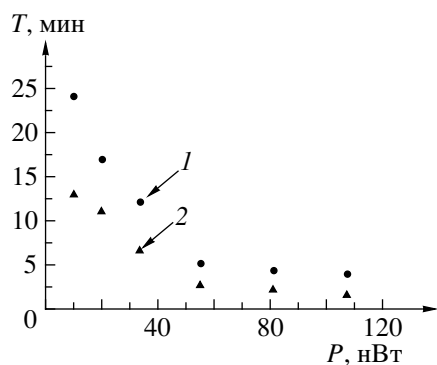
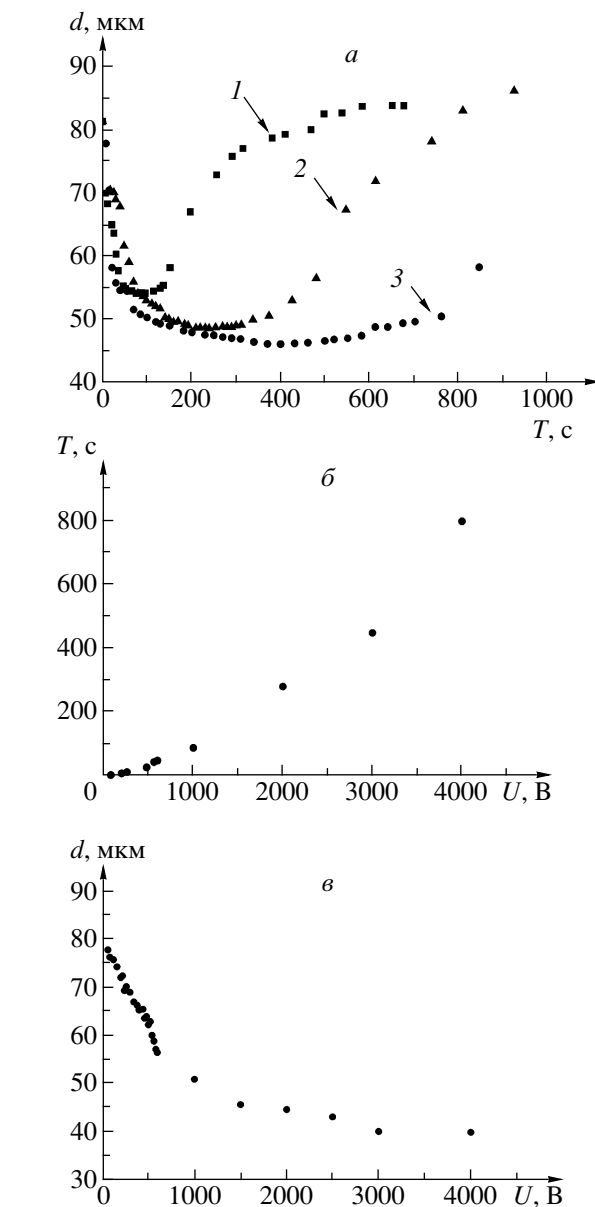


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Рис. 2. Динамика образования солитона в фоторефрактивном кристалле ВТО при внешнем электрическом напряжении $U = 4$ кВ и мощности светового пучка 70 нВт; t – в мин.Рис. 3. Зависимость времени образования (1) и времени стабильности солитонной структуры (2) в фоторефрактивном кристалле ВТО от мощности лазерного излучения при внешнем электрическом напряжении $U = 2.4$ кВ.

не дифрагируя, вследствие чего перетяжка, образованная внутри кристалла, переносится на заднюю грань кристалла.

Использовали фоторефрактивный кристалл ВТО с размерами $1.8 \times 4.75 \times 8.83$ мм, и световой пучок распространялся вдоль большой грани кристалла (кристаллографическая ось $[1, 1, 0]$). Перпендикулярно кристаллографической оси $[1, 1, 0]$ в направлении $[1, \bar{1}, 1]$ было приложено внешнее постоянное электрическое поле. При этом поля-

Рис. 4. Зависимости полуширины лазерного пучка на выходе из кристалла ВТО от времени (а) ($U = 1$ (1), 2 (2), 2.5 кВ (3)); времени стабильной фазы солитона (б) и минимального размера лазерного пучка на задней грани кристалла ВТО (в) от приложенного к кристаллу напряжения при мощности светового пучка 10 нВт.

ризация светового пучка совпадала с направлением электрического поля.

На рис. 2 представлена динамика образования солитоноподобной структуры в фоторефрактивном кристалле ВТО при подаче на него напряжения 4 кВ при мощности лазерного излучения 70 нВт.

Из рисунка видно, что при включении внешнего электрического поля лазерный пучок начинает заметно сжиматься в направлении поля и интен-

сивность его резко возрастает. После достижения минимального размера по указанному направлению ширина пучка некоторое время остается стабильной, а затем пучок медленно начинает расширяться. При этом размеры пучка в направлении, перпендикулярном внешнему полю, остаются практически неизменными. Как видно из рис. 2, формирование солитонной структуры происходит за времена порядка нескольких минут.

Исследования динамики формирования пространственных солитонных структур в кристалле ВТО позволили установить зависимость скорости формирования солитона и времени стабильной фазы солитона от мощности лазерного пучка и величины приложенного внешнего электрического поля. На рис. 3 представлены зависимости времени образования и стабильности пространственных солитонных структур от мощности лазерного излучения.

Из полученных данных видно, что при увеличении мощности лазерного излучения время образования и стабильности солитонов существенно уменьшается. Эффективное формирование солитонов наблюдается при весьма небольших мощностях светового пучка: порядка десятков и сотен нановатт. С повышением мощности (выше десятка микроватт) солитонные структуры быстро разрушались, что можно объяснить включением тепловых эффектов, приводящих к дефокусировке светового пучка.

На рис. 4а представлены типичные зависимости динамики изменения поперечного размера светового пучка при различных значениях электрического напряжения и фиксированной мощности пучка $P = 10$ нВт. Видно, что при увеличении напряженности внешнего поля эффект самофокусировки проявляется сильнее, причем увеличивается и время стабильности солитонной структуры. Так, например, если при напряжении 1 кВ структура оставалась стабильной всего 1.5 мин, то при напряжении 2 кВ – уже 5 мин, а при напряжении 2.5 кВ, соответствующем напряженности электрического поля в кристалле $14 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$, пространственный солитон сохранялся в течение десятка минут. Кроме того, как видно из рис. 4а, увеличение электрического напряжения приводит к увеличению времени установления солитонной структуры. Такую закономерность можно объяснить с позиции формирования экранирующего солитона, для образования которого внешнее электрическое поле должно быть значительно уменьшено в области солитонного канала. Для экранировки более высокого поля необходимо большее количество свободных зарядов и, следовательно, большее время их перераспределения.

Детальные зависимости времени стабильной фазы пространственного солитона и минимального размера лазерного пучка на выходе из кристал-

ла от приложенного к кристаллу напряжения представлены на рис. 4б и в соответственно. Полученные данные свидетельствуют о существовании критического минимального значения напряжения, необходимого для наблюдения солитона. Из рисунка 4в видно, что на начальном этапе минимальный размер пучка на выходе из кристалла резко уменьшается от 80 до 50 мкм при увеличении приложенного к кристаллу напряжения до 1 кВ, затем при увеличении напряжения до 3 кВ минимальный размер пучка уменьшается до 40 мкм, после чего остается практически неизменным. Таким образом, о формировании солитонной структуры можно говорить при напряжениях, превышающих определенное пороговое значение, порядка 1 кВ (напряженность поля $\sim 5 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$).

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования позволили определить условия существования низкоинтенсивных фоторефрактивных солитонов. Для кристалла ВТО определены пороговое значение напряженности внешнего электрического поля и предельное значение мощности светового пучка, определяющие условия формирования пространственных солитонов. Время стабильности солитонной структуры возрастает при увеличении приложенного к кристаллу напряжения и монотонно уменьшается при увеличении мощности лазерного излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахманов С.А., Сухоруков А.П., Хохлов Р.В. // УФН, 1967. Т. 93. С. 19.
2. Kip D. // Appl. Phys. B. 1998. V. 67. P. 131.
3. Aleshkevich V. A., Vysloukh V. A., Kartashov Y. V. // Quant. Electron. 2001. V. 31. P. 639.
4. Chiu A.E.T., Yeh P., Yang C., Gu C. // Opt. Lett. 1995. V. 20. P. 1125.
5. Guo A., Henry M., Salamo G.J. et al. // Opt. Lett. 2001. V. 26. P. 1274.
6. Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. СПб.: Наука, 1992. 320 с.
7. Buse K. // Appl. Phys. B. 1997. V. 64. P. 273.
8. Segev M., Crosignani B., Yariv A. // Phys. Rev. Lett. 1992. V. 68. P. 923.
9. Krolkowski W., Denz C., Stepken A. et al. // Quant. Semiclass. Opt., 1998. V. 10. P. 823.
10. Fressengeas N., Wolfersberger D., Maufroy J., Kugel G. // J. Appl. Phys. 1999. V. 85. P. 2062.
11. Iturbe Castillo M.D., Marquez Aguilar P.A., Sanchez-Mondragon J.J. et al. // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 64. P. 408.
12. Шенелевич В.В., Голуб А.А., Коваршик Р. и др. // Квант. электроника. 2005. Т. 35. С. 351.
13. Шенелевич В.В., Коваршик Р., Кислинг А. и др. // Квант. электроника. 2003. Т. 33. С. 446.
14. Singh S. R., Christodoulides D. N. // J. Opt. Soc. Am. B. 1996. V. 13. P. 719.
15. Agishev I.N., Pismennaya K.A., Kiessling A., Tolstik A.L. // Nonlinear Phenomena Complex Systems. 2004. V. 7. P. 291.